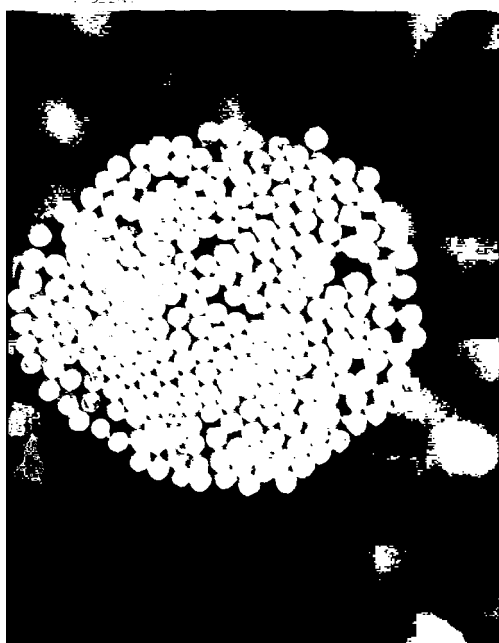


# LA LUZ PORTADORA DE INFORMACIÓN: LAS FIBRAS ÓPTICAS



*La fibra óptica es el medio más idóneo de transmisión para el envío de información entre puntos situados a distancias más o menos lejanas unos de otros.*

**C. Sameda**

CATEDRÁTICO DE LA UNIVERSIDAD DE PÁDOVA.

**J. A. Martín-Pereda**

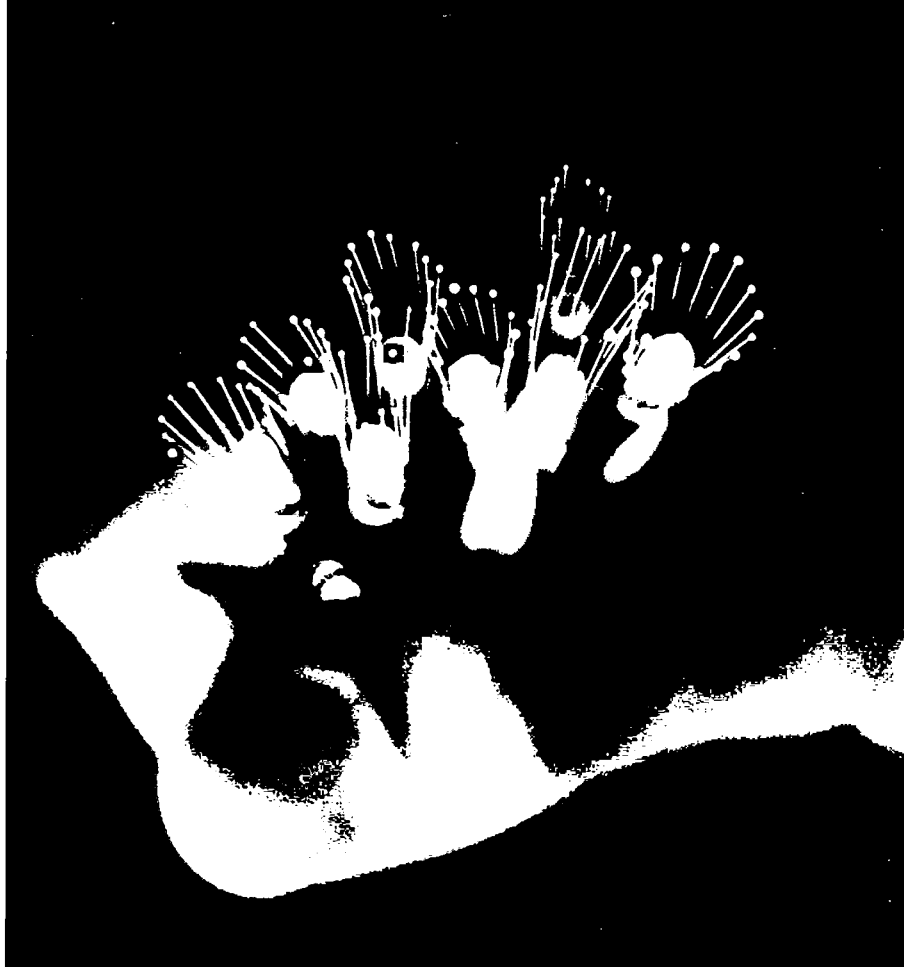
CATEDRÁTICO DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.

**L**a electricidad y la electrónica han sido, habitualmente, los elementos básicos para el desarrollo de las comunicaciones a través de medios guiados. Desde el viejo telégrafo hasta los modernos sistemas de transmisión de televisión por cable, todas las técnicas empleadas han tenido en común el envío de una señal eléctrica a través de un elemento conductor. De igual manera a como llega la electricidad a los hogares, por medio de un cable metálico, el teléfono, el télex, el facsímil... todos ellos emplean una técnica en cierta manera análoga: una corriente eléctrica, llevando con ella la información deseada, accede a un equipo capaz de convertirla en señal reconocible por el usuario. En ocasiones, cuando la frecuencia de la señal transmitida es lo suficientemente alta, puede no ser una corriente eléctrica análoga a la empleada, por ejemplo, para alimentar los electrodomésticos convencionales. En esas circunstancias la información es transportada por un campo electromagnético y el medio por el que se desplaza puede ser una guía metálica hueca. Pero todos los elementos que la rodean siguen estando basados en conceptos derivados del manejo de corrientes eléctricas y en su procesado mediante técnicas, en general, electrónicas.

Pero ésa no es la única posibilidad existente. Desde el invento del teléfono ya latía entre los profesionales de las comunicaciones la idea de que la luz podía ser, también, un elemento adecuado para transmitir señales. El mismo Alexander Graham Bell, tan sólo cuatro años después de patentar su teléfono, hizo otro tanto, en 1880, con el «fotófono». Su sistema se basaba en la reflexión de un haz luminoso, normalmente un rayo de

sol, sobre un diafragma situado al final de una especie de trompetilla a través de la cual Bell hablaba. La señal acústica hacía vibrar al diafragma y con ello se conseguía una cierta modulación de intensidad en la luz que se reflejaba. Ésta, a su vez, se recogía a una cierta distancia mediante un espejo que la enfocaba sobre un elemento sensible a la luz, como podía ser una célula de selenio, generándose en ella una corriente eléctrica que actuaba, finalmente, sobre un altavoz. Bell llegó a transmitir señales hasta una distancia de 200 metros y consideraba a su fotófono una invención superior a la del teléfono. Pero los problemas derivados de la atenuación de la señal luminosa con la distancia, y la no presencia constante de luz solar, cortaron muy pronto todo avance significativo en esta dirección. Además de estos dos hechos, un tercero hizo más difícil su desarrollo: la falta de confidencialidad. Con técnicas muy simples podía interferirse la información transmitida sin que apenas ni emisor ni receptor se dieran cuenta de que estaban siendo captados. Las mejoras en el teléfono y, poco después, el invento de la radio hicieron inútil tratar de buscar medios diferentes: la mayor parte de las necesidades de transmitir información quedaban satisfechas con ambos. La primera mitad del siglo XX quedó así ceñida a los avances de las comunicaciones por cable de cobre, como el teléfono, o por el aire, como la radio.

Pero existían una serie de razones bastante poderosas como para pensar que, en algún momento, la luz podría desempeñar análogo papel al que había desempeñado la electricidad. Una de las razones más poderosas se derivaban de las características de la propia luz. Si un haz luminoso se desplaza, por ejemplo, en un medio en el que existen motores y se producen de continuo chispas, la información que pueda llevar aquella no se ve en modo alguno perturbada por éstas. No ocurre lo mismo si la transmisión se hace por señales de



A. ATEL

radio o a través de un cable. Todos experimentamos la desagradable interferencia que se produce en la radio del coche cuando se viaja cerca de un tendido eléctrico de alto voltaje.

De igual manera, la luz posee otra característica que la hace superior para transmitir señales. Es su capacidad de llevar información en paralelo, esto es, que cada uno de los puntos de una superficie pueda tener información diferente de la de sus vecinos. El ejemplo más directo lo tenemos en el puro proceso de la visión, por el que nos llega toda la información sobre los elementos que están presentes en un cierto escenario en un único instante de tiempo. No ocurre como en el caso de las señales acústicas, en las que esa información se va enviando una tras otra, esto es, en serie. Un caso que, en una primera impresión, podía parecer también de envío de información en paralelo es el de la televisión. En los receptores se percibe una única imagen, análoga a la de una escena real. Pero esa imagen única es el resultado de la unión de una serie de puntos que emiten luz según la información que han recibido en instantes distintos de tiempo.

Aparte de otras muchas ventajas, sólo parece procedente mencionar aquí

una adicional a las anteriores: la de poder soportar una mayor cantidad de información, incluso cuando se transmita en un proceso serie. Este hecho se deriva de la frecuencia de la propia luz. Como ya es conocido de electromagnetismo, una radiación luminosa es, conceptualmente, análoga a cualquier otro tipo de radiación, por ejemplo, las ondas de radio. La única diferencia existente es su frecuencia. Si la electricidad que llega a las casas para fines domésticos tiene una frecuencia de 50 ciclos por segundo, y la señal de una emisora de radio puede encontrarse alrededor del millón de ciclos por segundo, la correspondiente a la luz visible llega a valores superiores al millón de millones de ellos. Como la información que puede llegar a contener una señal depende de su frecuencia, resulta evidente que la luz es un medio idóneo para hacerlo. Pero para que pudiera ser realidad era necesaria la aparición de una serie de elementos, y uno de ellos era la fibra óptica.

Los años cincuenta fueron, midiendo incluso con parámetros de hoy, uno de los momentos más significativos para el progreso de las telecomunicaciones. Tras el fuerte desarrollo económico surgido a raíz de la II Guerra Mundial, la

demanda de nuevas líneas de conexión con alta capacidad entre las grandes ciudades había encontrado respuesta tecnológica, en gran medida, gracias al paso a la sociedad civil de un gran número de desarrollos llevados a cabo con fines bélicos. El caso más señalado de todos fue el del radar.

Pero ya en esos mismos años, en los países más avanzados comenzaba a hacerse patente la idea de que los sistemas de transmisión típicos de esa época, que no eran otros que la radio y los cables coaxiales, no podían multiplicarse indefinidamente. Los métodos convencionales de propagación de señales, que se habían mantenido vigentes, al menos en concepto, desde los tiempos de Morse, no podían seguir soportando un aumento gradual de la frecuencia en la que la señal se transmitía. Por una parte, en el caso de la transmisión por cable, el efecto pelicular, que hace que la atenuación de la señal vaya aumentando según lo hace la frecuencia de la misma, obligaba a incrementar también el número de repetidores que era necesario disponer en una comunicación a larga distancia. Por otro, en el terreno de la radio, al aumentar también la frecuencia de la señal, ésta pasa a encontrarse en zonas donde las condiciones atmosféricas adquieren una influencia notoria sobre la calidad de la señal recibida.

Tras una serie de intentos de resolver el problema, muchos de los cuales entrañaban, además de una complejidad técnica, un incremento en el coste del sistema, se llegó a la conclusión de que la solución debía venir por otro camino. Y la respuesta vino dada con la invención, al principio de los años sesenta, del láser. Con él se dispuso de una herramienta que, al menos, tenía una frecuencia de trabajo que era tres órdenes de magnitud superior a la de cualquier otro emisor empleado hasta entonces. La atención que se dirigió hacia él por la mayor parte de las ramas de la ciencia y la tecnología, no fue superior a la que se le prestó desde el campo de las comunicaciones. Todo el mundo se mostró de acuerdo en que su presencia podría llegar a resolver los problemas que se habían presentado. Faltaba un único punto que resolver: ¿por dónde debería ir la radiación del láser?, ¿a través del aire, como las ►

ondas de radio, o por el interior de un medio que lo confinase, como era el caso de los cables coaxiales?

La primera solución, a través del aire, aunque cómoda en un principio por la sencillez de las posibles instalaciones necesarias, ofrecía análogas desventajas a las apuntadas antes para señales de radio de muy alta frecuencia: las condiciones atmosféricas influirían de una manera drástica sobre las características de la transmisión. Además, las condiciones de un lugar serían muy distintas de las de otro y por ello los sistemas habrían de diseñarse de acuerdo con las características de cada zona. Todo ello hacía que esta solución no fuera válida, salvo para situaciones muy concretas en las que, por ejemplo, no hubiera más remedio que establecer un enlace entre dos puntos con una zona entre ellos de muy difícil acceso.

Parecía, pues, obligado que la transmisión se realizara a través de un medio confinado, de manera análoga a como lo hacían las microondas, a través del cual la luz se desplazara sin contacto con el exterior. Las guías que en el momento inicial se diseñaron eran del orden de una décima de milímetro de diámetro y estaban constituidas por una secuencia de lentes de vidrio o de gas.

Pero aunque el concepto del guiado por un medio confinado estaba claro, faltaban aún bastantes puntos que resolver. Y uno de ellos tenía que ver con el láser que se utilizara. Parecía evidente que tendría que ser uno de pequeño tamaño, de fácil manejo y con un consumo reducido de energía. Los existentes en el sesenta eran o de gran tamaño y alto consumo energético, como los de rubí o los de neodimio, o tenían que trabajar a temperaturas muy bajas, como era el caso de los láser de semiconductor. De hecho, estos últimos eran los que parecía podían tener más posibilidades de aplicación, dado su pequeño tamaño y la facilidad con la que la información que se deseaba transmitir podía serles suministrada. Pero, ya entrada la década de los setenta, todavía seguían trabajando a la temperatura del nitrógeno líquido, esto es, a unos  $-195^{\circ}\text{C}$ .

El paso definitivo de la fibra óptica desde el terreno del laboratorio al de su uso diario en aplicaciones concretas se

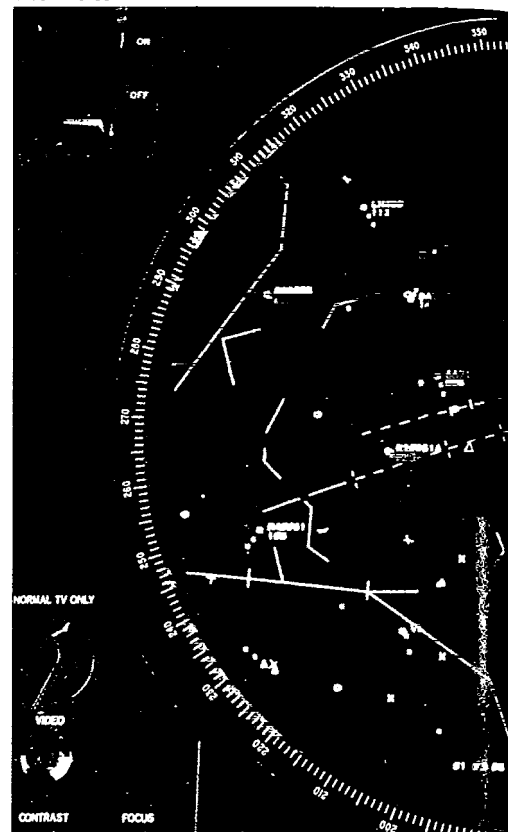
debe esencialmente a su victoria en cuatro frentes fundamentales y, sobre todo, a la increíble velocidad con que se ganó la batalla en ellos.

### ATENUACIÓN

La primera propuesta que se dio para el uso de fibra de vidrio como medio de transmisión de la luz fue hecha por Kao y Hockham, en 1966. En aquel momento, la mayor parte de los profesionales de la comunicación la consideraron o bien una herejía intolerable o bien una pura extravagancia. No es posible saber si las primeras experiencias de laboratorio, siguiendo lo indicado por Kao y Hockham, se hicieron por el mero hecho de intentarlo o por estar convencidos de la verdad de lo que se había sugerido. El hecho fundamental es que algunas de las principales industrias de telecomunicación de la época, y entre ellas la Corning Glass Works, el principal fabricante de vidrio del mundo, decidieron poner en práctica la idea apuntada por los investigadores.

La causa principal de la incredulidad mostrada por los expertos del ramo era que, al principio de los años sesenta, la atenuación que presentaban la mayor parte de los vidrios que podían ser usados para el fin deseado estaba por encima de los centenares de decibelios por kilómetro (dB/km). Para tener una idea de lo que esta cantidad suponía hay que partir del hecho de que una atenuación de, por ejemplo, 3 dB/km supone que si a la entrada de una fibra se introduce una determinada potencia, al cabo de un kilómetro su valor queda reducido a la mitad. Si la atenuación llega a los 100 decibelios la relación entre la potencia de entrada y la de salida es de  $10^{10}$ . O, dicho de otra manera, que lo que se podría recoger en el extremo final sería prácticamente inapreciable. Kao y Hockham habían indicado que la causa de estas elevadas pérdidas eran debidas a las imperfecciones que surgían en el proceso de fabricación de la fibra y, sobre todo, a las impurezas que podían estar presentes. En aquel momento se llegó a considerar que cuando la fibra llegase a una atenuación del orden de los 20 dB/km era cuando podía empezarse a pensar en ella como una solución viable. Pero estaba en la mente de casi

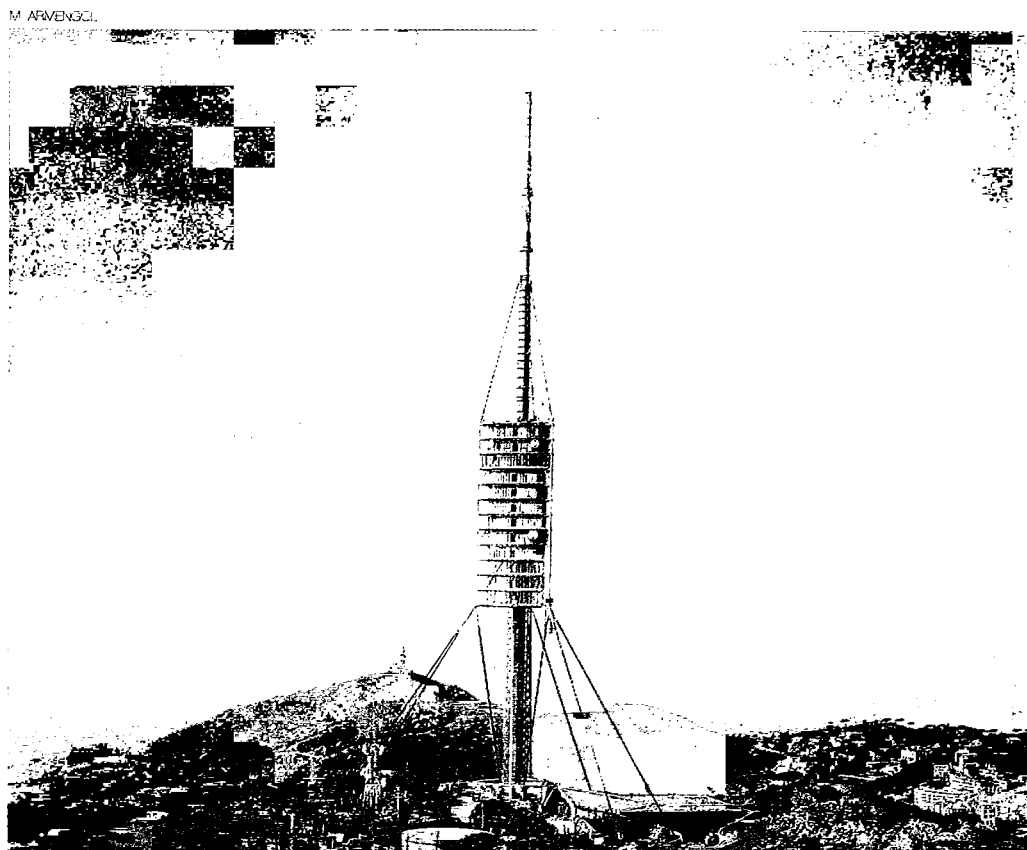
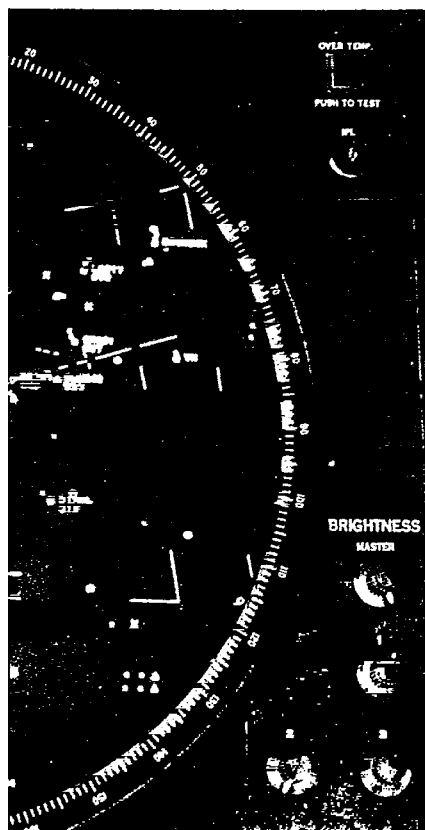
STOCK PHOTOS



todos que ese valor estaba muy lejos de poder ser obtenido en un futuro cercano. Y todos pensaban así hasta el 1 de octubre de 1970. En aquel día, en la sede londinense del Instituto de Ingenieros Eléctricos, al final de una mesa redonda dedicada a la comparación entre la transmisión de ondas milimétricas y por fibra óptica, y que hasta ese momento se había decantado netamente a favor de la primera, en un formidable golpe teatral, la Corning Glass, por boca del doctor Maurer, anunció la obtención de una fibra con la atenuación deseada de 20 dB/km.

A partir de ese momento la carrera para la obtención de menores atenuaciones comenzó y, así, al principio de los años ochenta se llegó a tener casi la atenuación que, desde un punto de vista de límite físico mínimo, se podía alcanzar. Los autores del presente trabajo no recuerdan ningún otro caso, en la historia de la tecnología, en la que en menos de diez años un objetivo prefijado de antemano se haya rebajado en una cantidad análoga a la obtenida con las fibras ópticas.

Este hecho ha determinado, a lo largo de los años transcurridos desde entonces, el éxito imparables de la fibra



óptica y la razón de su implantación masiva a nivel mundial. Ningún otro medio de transmisión podía ofrecer una atenuación semejante, ni ha podido desde entonces. Pero, además, existían otros factores que se aunaban a él para marcar más aun las distancias.

#### RIGIDEZ MECÁNICA

De la misma manera que la atenuación se logró reducir gracias a introducir procesos de fabricación alejados de los convencionales de tratamiento de vidrio comercial, la rigidez mecánica, esto es, la capacidad de no romperse fácilmente con un manejo no demasiado cuidadoso, se logró separándose de lo que se hacía habitualmente. En los años setenta, la fragilidad de las fibras de que se disponía era tal que, en muchas ocasiones, después de haberlas obtenido con gran trabajo durante una tarde y haberlas depositado con sumo cuidado encima de una mesa de trabajo, aparecían rotas a la mañana siguiente. Se llegó a difundir la idea de que había un duende nocturno que tenía como misión la de destruir el trabajo realizado durante el día. El principal problema que se desprendía de todo ello era, aparte de la

dificultad que podía presentarse para su instalación en un tendido real, la imposibilidad práctica de enrollarla en tambores para transportarla.

Como en la mayor parte de las cosas, la solución vino de la forma más sencilla posible. El origen de la fragilidad del vidrio proviene de las microgrietas que se forman en su superficie al solidificarse en contacto con el aire. Si dichas grietas no apareciesen, la fibra de vidrio podría combarse sin peligro de rotura. La forma de remediarlo fue con el simple recubrimiento de la fibra, nada más ser fabricada, de una finísima película plástica. Con ello se protegía del ambiente y mantenía sus propiedades iniciales.

#### CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN

La luz, al poseer unas propiedades equivalentes a las de cualquier radiación electromagnética, como pueden ser las ondas de radio o las microondas, es capaz de transmitir como ellas una cantidad de información que depende de su frecuencia. En el caso de que el medio de transmisión elegido sea la fibra óptica, la zona de frecuencias que se deberá tomar será, como es lógico, aquella en la que tenga menores pér- ➤

*A la izquierda, radar del aeropuerto de Francfort. Sobre estas líneas, la Torre de Comunicaciones de Barcelona, diseñada por el arquitecto Santiago Calatrava. Este tipo de edificaciones forma ya parte del paisaje urbano de las grandes ciudades.*

didas. Esta zona no se corresponde con ninguna parte del espectro visible, sino que se encuentra muy próxima a él pero ya en el infrarrojo. En esa región, la frecuencia es del orden de  $10^{13}$  ciclos por segundo, lo que está muy por encima de las frecuencias utilizadas en cualquier otro sistema de comunicaciones. Esto quiere decir que la cantidad de información que podría ser capaz de llevar consigo sería también muy alta. Eso es lo que, se denomina ser capaz de transmitir «banda ancha».

Pero en condiciones normales aparecen una serie de fenómenos que impiden que lo anterior se lleve a cabo de una forma completa. Para verlo consideremos el caso de envío de información más usual, que es mediante el envío de señales digitales, esto es, mediante pulsos, que representan un «1» o ausencia de ellos que representan un «0». Para que no hubiera problemas en la transmisión, cada uno de los pulsos introducidos en un extremo de la fibra, que supondremos tienen forma rectangular, debería aparecer en el otro extremo con una forma idéntica, aunque, quizá, con una amplitud menor debido a la atenuación. Pero la realidad es que a la salida estos pulsos aparecen muy distorsionados debido a un conjunto de fenómenos cuyo detalle no vamos a precisar aquí. De ser rectangulares con una duración determinada, pasan a tener una forma acampanada y ser notoriamente más anchos. Este ensanchamiento limita la mínima distancia con la que un pulso puede seguir, a otro ya que si están muy próximos pueden llegar a solaparse a la salida y falsear la información que se recoge. Este solapamiento depende de la distancia a la que se encuentra la salida, de las características de la fibra y del emisor de luz empleados. En los años setenta, la máxima velocidad de transmisión que podía alcanzarse no sobrepasaba a algunos pocos millones de pulsos por segundo (Mbits/seg).

La solución a este problema vino con la presencia de dos tipos de fibras ópticas muy particulares. La primera es la que se denomina «monomodo» y que es, esencialmente, una fibra con un núcleo muy fino por el que se desplaza la luz, menor por lo general de 10

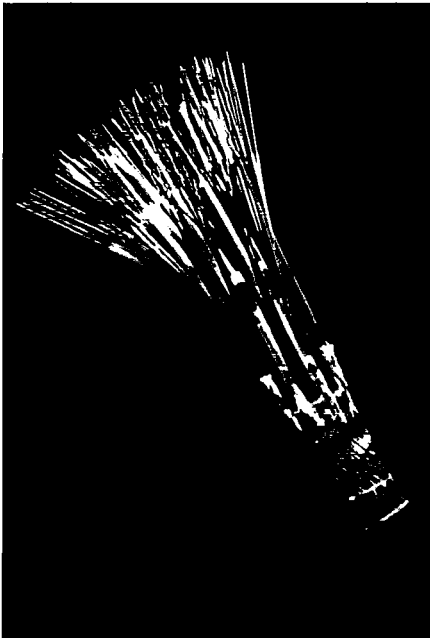
micras, esto es, diezmillonésimas de metro. La segunda es la conocida como de «índice gradual» y que tiene un núcleo en el que el índice de refracción no es constante sino que varía disminuyendo del centro a la cubierta. La batalla entre las dos fue favorable a la segunda durante la década de los setenta y parte de los ochenta. Pero las grandes dificultades existentes para obtener perfiles con una variación del índice de refracción en función del radio, que dieran unas mayores posibilidades de transmitir grandes anchos de banda, hicieron que a partir de mediados de la década de los ochenta la vencedora, al menos momentánea, haya sido la fibra monomodo, una vez superadas las dificultades iniciales para su fabricación masiva.

Por otra parte, el estudio que se ha hecho de qué frecuencias de luz eran las más adecuadas para ser transmitidas por la fibra, aparte de por la atenuación que podían sufrir, condicionó también la solución adoptada hoy. La transmisión con frecuencias correspondientes a unas longitudes de onda de unos 1.300 y 1.550 nanómetros se vio que eran las más adecuadas por ser en ellas donde los pulsos a que se ha

aludido antes sufrían menos distorsiones, debido a fenómenos como los denominados de «dispersión cromática» o de «por efecto de la guía». El primero se debe a que las diferentes longitudes de onda de que puede estar compuesto un pulso de luz viajan a diferente velocidad en el interior de la fibra, debido a la variación del valor del índice de refracción con la longitud de onda. Es como si, por ejemplo, la luz que se introdujese al principio de la fibra estuviera compuesta por luz verde y por luz roja, y cada una de ellas tuviera una velocidad distinta en el seno de la fibra. Aunque ambas hubieran entrado al mismo tiempo, saldrían en diferentes instantes, con lo que el pulso inicial se habría distorsionado, esto es, habría pasado a tener una forma diferente. Según se demostró, si las longitudes de onda de las que estaba compuesto el pulso de entrada se encontraban alrededor de los 1.300 nanómetros, esta variación de velocidades sería mínima. Es por ello que esa zona, conocida como «segunda ventana», sea la más utilizada.

Durante un breve intervalo de tiempo, alrededor de la mitad de la década de los setenta, el optimismo creciente





*La fibra óptica ha simplificado las comunicaciones, tanto en materia de instalaciones como de perfección en la recepción de los mensajes.*

de los productores de fibra, que habían resuelto los problemas mecánicos y de atenuación vistos anteriormente, se contrapuso con las preocupaciones de los fabricantes de dispositivos emisores de luz, que no conseguían obtener láseres con la suficiente fiabilidad como para poder ser instalados en sistemas comerciales. Aunque tras la fabricación se seguía un escrupuloso proceso de selección, la vida media de los láseres que se obtenían, que eran todos ellos de semiconductor, no llegaba a unos pocos miles de horas, durante las cuales se asistía a una lenta degradación de las prestaciones dadas y, finalmente, a una rotura catastrófica de los mismos.

El principal problema que se presentaba era que el material usado, el arseniuro de galio, era un semiconductor con el que se había trabajado y experimentado mucho menos que con el silicio, elemento básico de la electrónica de entonces y de la de hoy. Así como la mayor parte de los procesos de producción de éste eran perfectamente conocidos, en el caso del arseniuro de galio existían aún una gran cantidad de fenómenos todavía desconocidos y que, al no estar controlados, dificultaban la obtención de las propiedades deseadas.

Su uso en diodos electroiluminiscentes, como los empleados, por ejemplo en paneles o en relojes digitales, al tener unos requisitos menos estrictos que los precisos en los láser, podían por el contrario alcanzar vidas medias cercanas a los centenares de miles de horas, valor éste ya compatible con las necesidades de los sistemas de comunicaciones. Ello hizo que, durante un tiempo, y por una serie de condicionantes que es imposible comentar aquí, se realizaran enlaces mediante este tipo de diodos empleando, al mismo tiempo, unas fibras de diámetro mayor que las indicadas anteriormente, entre 50 y 100 milésimas de milímetro, y que reciben el nombre de fibras «multimodo».

Pero al final de los setenta los procesos de producción alcanzaron unas características que ya permitieron fabricar diodos láser con las prestaciones deseadas. Aunque el arseniuro de galio seguía siendo, como lo sigue siendo hoy, «el eterno material del futuro», su

control era mucho más preciso y de él surgió toda una familia de compuestos que pudieron cubrir las necesidades de las fibras ópticas, tanto en lo que se refería a la frecuencia de la radiación emitida, como a la fiabilidad o a las características del haz que había de ser introducido en la fibra.

Con todo ello se alcanzó el inicio de la situación actual, en la que las fibras ópticas se han convertido en el medio de transmisión más idóneo para el envío de información entre puntos situados a distancias más o menos lejanas uno de otro.

### EL FUTURO

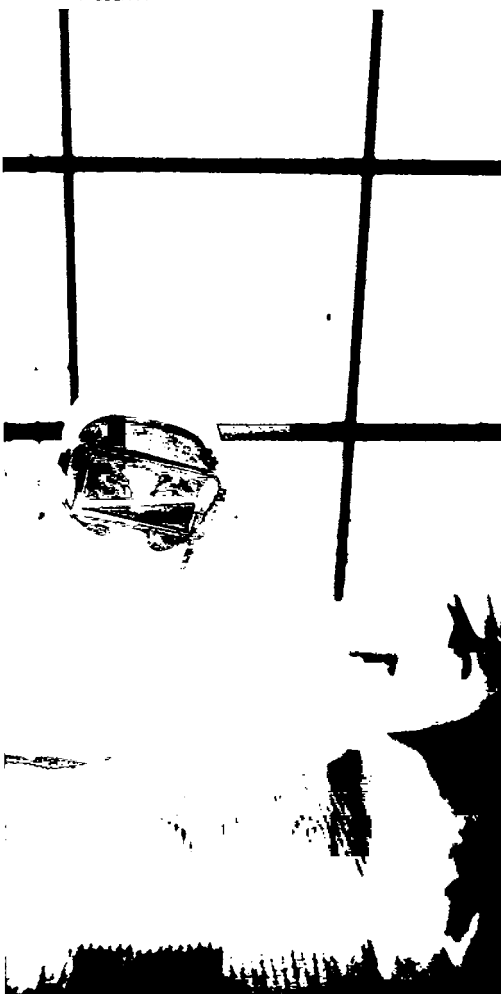
Así como la fibra óptica convencional puede considerarse que ha llegado a un estado en el que muy pocas mejoras pueden esperarse en los próximos años, mucho de lo que la rodea, tanto en el terreno de los sistemas como en el de los dispositivos activos, todavía espera soluciones más idóneas. En algunos casos, éstas tienen que ver con el fin de poder hacer realidad la consecución de unas verdaderas comunicaciones ópticas, en el sentido integral de la palabra.

O, dicho de otro modo, unas comunicaciones en las que la mayor parte de los sistemas, componentes y equipos que estén presentes trabajen únicamente con luz. La electrónica, principal protagonista de las comunicaciones hoy, pasaría a desempeñar un papel secundario.

Es seguro que este hecho tardará aún muchos años en ser logrado en su totalidad. Pero gran parte de las ideas físicas que serán precisas están ya experimentadas, sobre prototipos de laboratorio, en los centros de investigación más importantes.

El primer paso que se dio en ese sentido fue con la aparición, hacia 1988, de la primera fibra capaz de amplificar la luz que pasaba por ella, sin necesidad de apenas ningún tipo de apoyo electrónico. En los laboratorios de la Universidad de Southampton, en Inglaterra, se inventó un tipo de fibra óptica en la que, mediante la adición de impurezas de tierras raras, y más en concreto de erbio, podía lograrse una situación equivalente a la de un amplificador láser. Si la luz que había recorrido una larga distan- ➤

IMAGE BANK



**La aplicación del láser es ya un hecho cotidiano en la vida industrial, médica... Incluso el mundo del espectáculo y del arte lo han hecho suyo.**

cia a través de una fibra convencional y, como consecuencia de ello, había perdido parte de la intensidad que inicialmente tenía, se la hacía pasar por un trozo de algunos metros de este nuevo tipo de fibra, podía volver a recuperar la amplitud que tenía en un principio. Las ventajas de este hecho fueron enseguida apreciadas por todos los relacionados con las comunicaciones ópticas, tanto fabricantes como usuarios. Ya no eran necesarios, con ellas, los complicados repetidores electrónicos que había que distribuir periódicamente a lo largo de un enlace. El proceso de conversión de la señal luminosa a señal eléctrica, para poder ser amplificada y, posteriormente, vuelta a convertir en señal óptica para ser introducida a un nuevo tramo de fibra, era ya innecesario.

Desde la fecha de su aparición hasta hoy se han sucedido una larga serie de mejoras en sus propiedades, tanto ópticas como mecánicas. Con toda seguridad, dentro de muy pocos años, la mayor parte de los enlaces de larga distancia estarán basados en estas fibras dopadas con tierras raras. La robustez y la fiabilidad de sus características hacen de ellas los elementos idóneos para su empleo en situaciones donde el uso de la electrónica origina problemas.

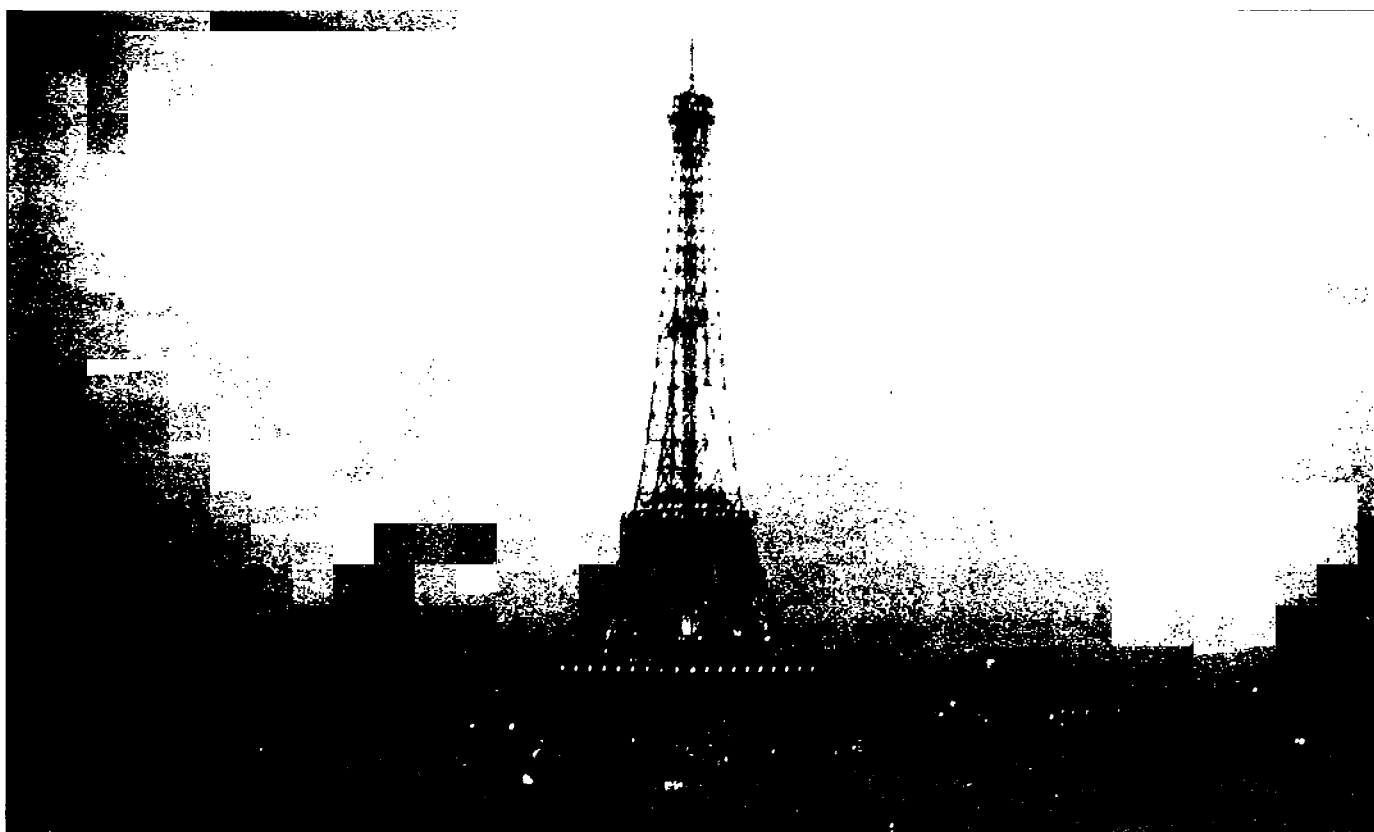
Es evidente, por otra parte, que estas nuevas fibras, para que puedan tener las propiedades amplificadoras que se han apuntado, han de trabajar en unas condiciones análogas a las de un láser. Para ello, cuando la luz que se desea amplificar pasa a su través, ha de existir en sus átomos unas ciertas condiciones entre los electrones que ocupan sus niveles. Es lo que en teoría del láser se denomina inversión de poblaciones. Mediante una excitación externa ha de hacerse que el número de átomos que tienen sus niveles superiores ocupados sea superior al de los que los tienen en estado no excitado. Y esto se logra en las fibras ópticas, mediante el paso de una fuerte intensidad de luz, con la frecuencia óptica adecuada, por el tramo amplificador. Este proceso se lleva a cabo mediante la luz de otro láser, que se introduce en la fibra. Las características de éste, y cuál es el método más eficaz para lograr la mejor amplificación, es todavía

objeto de desarrollo. Pero las bases científico-técnicas están asentadas y sólo queda un cierto desarrollo de algunos temas.

De hecho, durante el pasado año, varios grupos americanos demostraron la posibilidad de una transmisión en multicanal, mediante amplificadores dopados con erbio. Uno de ellos desarrolló un sistema de larga distancia compuesto por cuatro canales de 2,5 Gb/s y capaz de alcanzar una distancia de 9.000 kilómetros. Al final de esa distancia, cuando el error tolerado usualmente es de un bit erróneo por cada  $10^9$  enviados, se alcanzó un error de un bit erróneo por cada  $10^{10}$  transmitidos. Otro grupo alcanzó una velocidad de transmisión de un tercio de terabit por segundo, a través de una fibra óptica. Finalmente, otro grupo llegó a enviar 40 Gb/s a través de una fibra de 1.420 kilómetros, mediante el envío de 16 canales de 2,5 Gb/s. Los amplificadores de erbio se encontraban separados entre sí una distancia de 123 kilómetros, casi el doble que la normalmente empleada. Este canal, que ya ha sido denominado «autopista de 16 carriles», triplicó lo conseguido hasta entonces.

Por otra parte, la introducción de las anteriores fibras amplificadoras, ha revitalizado al mismo tiempo otro concepto que, hasta hace no muchos años, sólo estaba presente en artículos teóricos de comunicaciones ópticas o en ensayos de laboratorio de escaso interés práctico. Este concepto es el de «solitón».

Un solitón, en el sentido primitivo que tenía cuando fue encontrado por vez primera, en 1834, en el canal de Edimburgo a Glasgow, por J. Scott Russell, no era sino una onda solitaria que podía propagarse por la superficie del agua, sin apenas variar sus características, durante una distancia relativamente larga. Según describe Scott Russell en su informe de 1844, si una pequeña embarcación era arrastrada por el centro del canal, por dos caballos que caminaban paralelos a sus orillas, y éstos se detenían de pronto, aunque la barca se parase, se generaba en el agua una especie de ola que avanzaba, con una velocidad casi constante y sin apenas cambio de forma, durante un largo intervalo de tiempo.



Este hecho fue estudiado durante más de 130 años sin que se encontrase una aplicación concreta para el mismo. Aunque sus posibles aplicaciones en comunicaciones ópticas no pasaban desapercibidas para nadie, su realización práctica distaba mucho de poder ser una realidad. Ello se debía a que el proceso por el que el solitón podía propagarse indefinidamente sin alterar sus propiedades se basaba en una especie de equilibrio entre su intensidad y forma y las propiedades del medio por el que se propagase. Si la intensidad disminuía, el solitón perdía sus características y se convertía en un pulso de luz convencional. Como ya se ha visto antes, cualquier fibra da lugar, aunque pequeña, a una cierta atenuación. Y esta atenuación era la responsable de la imposibilidad de mantener indefinidamente a un solitón propagándose por una fibra óptica.

El problema desapareció gracias a la presencia de las fibras amplificadoras. Si a un sistema convencional se le añadían, periódicamente, tramos con ese tipo de fibras, podía lograrse mantener la forma del solitón y, con ello, su propagación indefinida. La literatura técnica muestra, en los últimos años, una larga

serie de experiencias en las que se ve cómo un solitón ha recorrido distancias por encima de varios miles de kilómetros sin alterar sus propiedades. En concreto, las posibles aplicaciones más inmediatas de este tipo de transmisión se encuentran agrupadas en dos grandes bloques. El primero se refiere a la transmisión a muy largas distancias, por encima de los 10.000 kilómetros, y con velocidades de envío de señales por debajo de los 40 Gbit/s. Este tipo de comunicaciones es la típica de un enlace transoceánico. El segundo bloque se centra en el envío a distancias más cortas, por debajo de los 1.000 kilómetros, pero con velocidades de transmisión del orden de los 100 Gbit/s. En este terreno, una de las contribuciones más significativas ha sido la realizada por un laboratorio japonés de transmitir señales de 80 Gb/s a una distancia de 500 kilómetros, y que fue presentada en la Conferencia Europea de Comunicaciones Ópticas, (ECOC'94). Realizaciones como ésta indican que es posible que antes de cinco años empiecen a aparecer sistemas ya reales de comunicaciones ópticas en los que, en algunos de sus tramos, se empleen solitones como

elementos portadores de la información. Podría decirse así que el camino de los solitones se inició lentamente, pero ya es imparable.

Quedan, como es lógico, muchos otros terrenos en los cuales todavía queda mucho trabajo que realizar. Uno de ellos es la consecución de centrales de comunicación que sean capaces de encaminar las señales ópticas que lleguen a ellas sin necesidad de realizar el proceso de conversión de las mismas a señales electrónicas, como se hace hoy, para poder procesarlas. O, dicho de otra manera, conseguir algo equivalente a lo que hacen las fibras amplificadoras con la intensidad de la luz, pero con el camino que ha de seguir ésta. Este objetivo se conoce bajo el título global de «conmutación fotónica» y en él intervienen todo un conjunto de elementos que van desde el uso de materiales no lineales hasta el empleo de técnicas holográficas para el encaminamiento de los haces de luz. Pero ese tema se saldría del objetivo central del presente trabajo, que ha sido el de presentar a la fibra como la principal responsable del protagonismo de la óptica en las comunicaciones de este final de siglo. ■